

INSPEÇÃO DA EFICÁCIA DE OBRAS DE CONTENÇÃO DE EROSÃO POR MEIO DO GPR

Inspection of the effectiveness of erosion control works by means of the GPR

Lúcia Maria da Costa e Silva*

Gustavo Nogueira Dias**

RESUMO – O radar de penetração do solo (GPR) foi utilizado ao longo de 600 m da margem do rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e o Porto de Canoagem, dentro do campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém/PA (Brasil), durante a maré baixa e a maré alta, na tentativa de mapear os caminhos preferenciais em subsuperfície para a entrada de água trazida pela maré alta e, por esse meio, inspecionar a eficácia de obras de contenção de erosão. Em maré baixa, a erosão está ligada à perturbação da continuidade das camadas e a contenção pode causar forte absorção das ondas eletromagnéticas. Em relação às medidas obtidas na maré baixa, as medidas em maré alta mostram a acentuação de reflexões obtidas com o GPR onde a erosão é fortemente atuante e onde a obra de contenção não está sendo efetiva. O GPR pode ser usado para inspecionar a eficácia de obras de contenção de erosão fluvial, bem como possivelmente outras.

ABSTRACT – The ground penetrating radar (GPR) was used along 600 m of the banks of river Guamá, between the Tucunduba river bridge and the Port of Canoeing, in the campus of the Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém/PA (Brazil), during low tide and high tide, in order to map the subsurface preferential pathways for the entry of water brought by the high tide and, thereby, to inspect the effectiveness of erosion control works. At low tide, erosion is linked to the disturbance of the continuity of bedding and protection works can cause strong absorption of electromagnetic waves. Compared to the measurements at low tide, the measurements at high tide show the accentuation of GPR reflections obtained where erosion is strongly active and where the protection work is not effective. GPR can be used to inspect the effectiveness of river erosion control works, and possibly others.

PALAVRAS CHAVE – Erosão, contenção, GPR.

1 – INTRODUÇÃO

O *campus* da Universidade Federal do Pará (UFPA), localizado no Bairro do Guamá em Belém do Pará, foi inaugurado em 13 de agosto de 1968, com cerca de 3 km de limite com o rio Guamá, o que lhe empresta uma especial beleza. A orla do campus, contudo, é palco de um processo de erosão fluvial marcante que tem motivado várias obras de contenção da erosão.

Desde 2008 vem sendo pesquisada a aplicação de diferentes métodos geofísicos ao longo da orla com a finalidade de se verificar a utilidade dos mesmos em detectar as zonas em que a ação da erosão, embora ainda não observável em superfície, predomine, de modo a direcionar obras de contenção da orla antes que ocorra seu desmoronamento (Dias, 2012). Vários dos levantamentos

* Professora Associada, Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Doutora em Geofísica. E-mail: luciamcs@ufpa.br

** Professor da Escola Federal Tenente Rêgo Barros, Mestre em Geofísica. E-mail: gustndias@gmail.com

geofísicos foram realizados em trechos da orla com diferentes tipos de obras de contenção da erosão, prestando-se, conseqüentemente, embora não fosse alvo da pesquisa, para analisar a resposta aos diferentes métodos geofísicos dessas obras. O objetivo deste trabalho é a apresentação dos resultados obtidos por meio do método geofísico Radar de Penetração do Solo, muito conhecido como GPR, do inglês *Ground Penetrating Radar*. Esse método não é destrutivo nem invasivo do terreno, permite um levantamento muito rápido e fornece resultados de alta resolução.

O GPR emprega a emissão de pulsos eletromagnéticos a partir de uma antena transmissora colocada próxima à superfície do terreno, cuja frequência corresponde à frequência central da antena, podendo estar situada entre 2 e 2500 MHz. Os pulsos propagam-se nos materiais da subsuperfície sofrendo reflexão, refração e difração ao encontrarem mudanças nas propriedades eletromagnéticas do meio (em especial, a permissividade elétrica). As ondas refletidas retornam à superfície, sendo detetadas pela mesma antena transmissora ou por antena receptora próxima à antena transmissora. O resultado é o registro vertical do tempo de chegada da onda refletida e amplitude da onda (*scan* ou traço) para cada posição irradiada; a reunião de vários *scans* forma o radargrama. Esse gráfico aparece em bandas horizontais em preto, branco e cinzas; reflexões fortes geram bandas pretas, enquanto reflexões medianas, bandas em tons cinza. O sinal detectado permite estimar a profundidade de cada interface de reflexão desde que se conheça a velocidade de propagação da onda no meio. Como a permissividade elétrica é sensível à presença de água no terreno, a hipótese testada foi que o GPR poderia apontar os caminhos da água introduzidos pela erosão após a obra de contenção, servindo para a inspeção de sua eficácia.

O levantamento GPR foi realizado tanto em maré baixa como em maré alta. Em maré baixa, os caminhos da água subsuperficial introduzidos pela erosão permitem o escoamento da água da chuva e da água remanescente trazida anteriormente pela maré alta. Em maré alta, o aporte adicional de água permitiria um maior contraste de permissividade elétrica com o meio, facilitando o reconhecimento dos caminhos da água e, por conseguinte, dos locais com o fenômeno de erosão mais efetivo.

Augustin e Aranha (2006) estudaram na cidade de Gouvêa (MG) a detecção com o GPR de dutos naturais subterrâneos (pipes) presentes no processo de erosão, com ou sem a ocorrência de colapso do teto. Xavier Neto e Medeiros (2003) e Xavier Neto (2006) apresentam resultados GPR obtidos no campo de petróleo de Fazenda Belém, Bacia Potiguar (CE), com o objetivo de entender os mecanismos de geração de colapsos do terreno associados à existência de um substrato carbonático intensamente fraturado e karstificado.

Esses trabalhos, assim como o de Carpenter e Ahmed (2002), lidam com macroporos, ou seja, lidam com feições maiores e efeitos físicos consideráveis, não encontrados na orla do campus da UFPA, e não fazem menção aos efeitos de obras de contenção porventura existentes nas áreas investigadas. Carpenter e Ahmed (2002), em adicional, em seu resumo sobre detecção de infiltração, não fazem menção ao GPR.

2 – ÁREA

A área sob estudo está localizada no interior do *campus* do Guamá da UFPA, que ocupa 450 ha entre a Av. Augusto Correa e a Av. Perimetral no bairro do Guamá da cidade de Belém (PA), à beira do Rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e a Sede da Canoagem (Figura 1), margem do rio Guamá de intensa erosão. Sua topografia é praticamente plana.

Belém é, predominantemente, coberta pela unidade Pós-Barreiras, constituída por sedimentos recentes (latossolos), representados por areias inconsolidadas intercaladas por argilas que aparecem distribuídos especialmente nas orlas dos rios e igarapés e pelo Grupo Barreiras, que engloba sedimentos continentais argilosos a arenosos, com níveis de arenitos ferruginosos (Matta, 2002).

Um furo de sondagem a trado, realizado na posição marcada com um círculo branco na Figura 1, permitiu identificar cinco camadas: húmus (0-0,18 m de profundidade), silte e argila (0,18-0,50 m), argila e seixos (0,50-0,67 m), areno-argiloso (0,67-0,99 m) e argila (0,99-até pelo menos 1,45 m de profundidade).

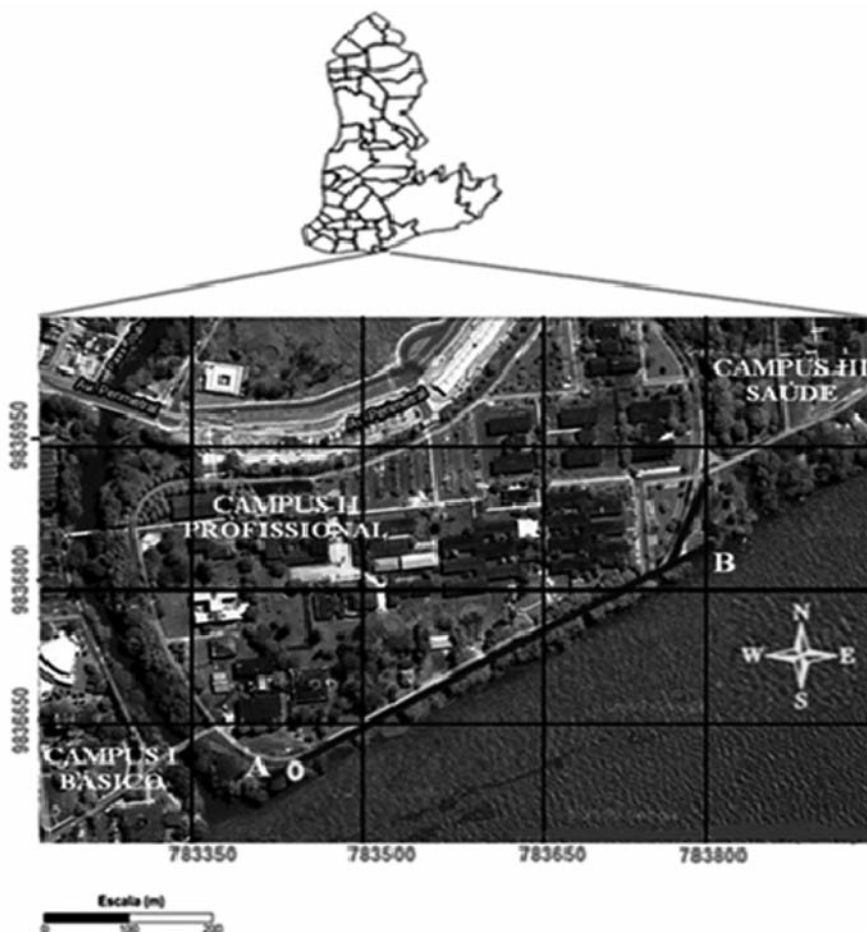


Fig. 1 – Área do *campus* da UFPA mostrando em preto o perfil AB e trecho de área de direção NE levantada adicionalmente pelo GPR (Google, 2010). Círculo branco: furo.

Amostras dessas camadas foram submetidas à análise granulométrica através do processo de peneiramento descrito na NBR-7181/ABNT e os resultados, lançados na fórmula de erodibilidade de Bovoucos, que relaciona o tamanho das partículas com a suscetibilidade do solo em resistir aos processos erosivos (Berton e Lombardi Neto, 1990). O quarto nível (camada areno-argilosa) mostrou o maior índice de erodibilidade (2,82) e o nível abaixo dele (camada de argila), o de menor erodibilidade. O nível hidrostático foi encontrado a cerca de 0,8 m em maré baixa.

3 – LEVANTAMENTO DOS DADOS

O levantamento de dados GPR foi realizado com um equipamento TerraSIRch System-3000 fabricado pela empresa *Geophysical Survey Systems Inc.* com antenas de 200 MHz. Testes anterior-

res mostraram que a antena disponível com frequência central superior, igual a 400 MHz, em condições amazônicas (umidade excessiva e manto de intemperismo rico em argila) gera radargramas muito atenuados e mostrando uma penetração muito pequena inferior a de interesse para este trabalho (pelo menos 1,45 m).

As medidas foram obtidas com as antenas com afastamento constante ao longo do perfil AB mostrado na Figura 1 nos dias 14 (lua minguante) e 15 (lua cheia) de março de 2010.

4 – PROCESSAMENTO

O processamento dos dados foi realizado com o programa *REFLEX-WIN 5.2* desenvolvido por *Sandmeier Software* e envolveu correção estática, interpolação das marcas de posicionamento, remoção do ganho inicial, aplicação do ganho linear e exponencial, aplicação de filtros 1D (*Butterworth e Dewow*), aplicação de filtro 2D (*Running Average*) e conversão do tempo de chegada das ondas, em profundidade a partir da velocidade de 0,085 m/ns obtida por meio do ajuste de hipérbole provocada por objeto enterrado a profundidade conhecida (30 cm).

A Figura 2 mostra o radargrama bruto para o trecho 0-50NE do perfil e o mesmo radargrama após o seu processamento como anteriormente descrito, ambos obtidos na maré baixa. Destaca-se a correção estática, que coloca o primeiro registro dos traços em uma mesma posição, eliminando a parte superior na qual ainda não há o registro. As demais operações permitem tornar as feições de interesse mais inteligíveis para a interpretação e a conversão do tempo de chegada das ondas mostra a provável profundidade de ocorrência dessas feições.

5 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram selecionados seis trechos do perfil AB e seus respectivos radargramas obtidos nas marés baixa e alta, que são mostrados nas Figuras 2 a 7. Os estratos com predominância de areia são bastante visíveis nos radargramas, enquanto aqueles com predominância de argila aparecem atenuados. Em todos os radargramas, o sinal é absorvido pela camada de argila encontrada pelo furo por volta de 1 m de profundidade, que apresenta a menor erodibilidade da seção geológica.

A presença de erosão se mostra ligada à perturbação da continuidade dos níveis estratigráficos e, também, pequenos dobramentos das camadas (refletores). Em maré alta, o aumento do contraste entre as propriedades elétricas promovido pelo aporte de água nos poros existentes intensifica as reflexões nos estratos em que sua presença ocorre em maior quantidade. Em condições de sizígia, a variação da maré atinge 3,6 m na área (Gregório e Mendes, 2009), mas na ocasião do trabalho não teria ultrapassado 1,5 m.

O trecho 0-50NE (Figura 2) apresenta variação mínima entre os radargramas processados obtidos nas duas marés. Essa variação entre os radargramas é mais percebida, apesar de ser muito pequena, de SW para NE do radargrama. O trecho 0-50NE pode ser considerado como pouco afetado pela erosão, especialmente a SW, possivelmente pela camada de argila ali estar mais próxima da superfície.

O trecho 320-380NE (Figura 3), por sua vez, mostra variação considerável entre os radargramas obtidos nas duas marés. Este trecho, ao contrário do anterior, é bastante afetado pela erosão. As obras de contenção presentes na área, muros de concreto e sacos de cimento sobre a margem, atuam quebrando o movimento da maré, barrando a entrada de água e, no caso dos sacos de cimento, impermeabilizando o meio.

A impermeabilização promovida pela contenção com sacos de cimento, com a forte absorção das ondas eletromagnéticas é observada na Figura 4 entre cerca de 530 e 542NE. A absorção das

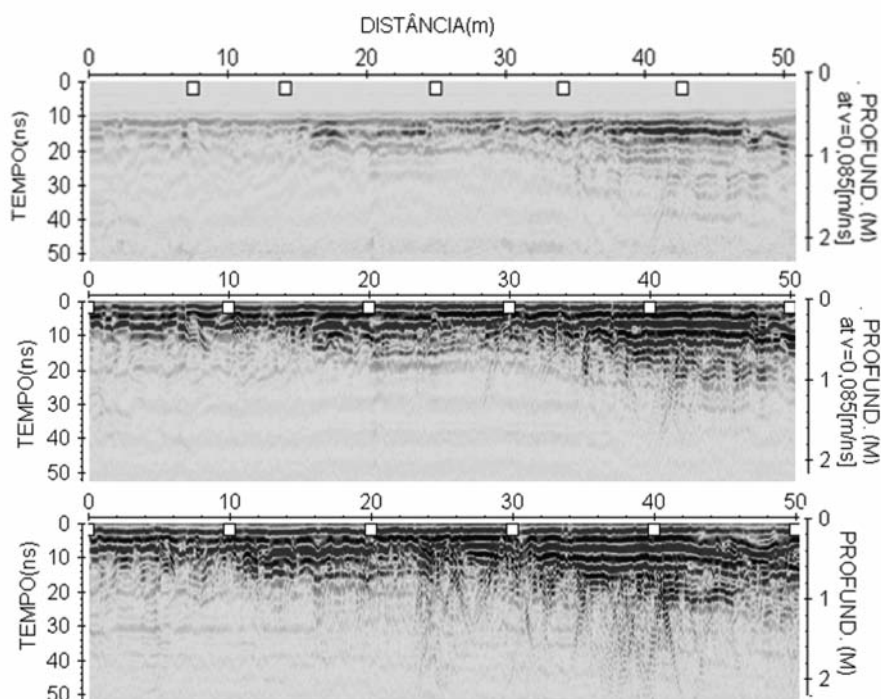


Fig. 2 – Trecho 0-50NE do perfil AB sem forte atuação da erosão. Radargramas bruto (acima) e processado (no meio) obtidos na maré baixa. Radargrama processado obtido na maré alta (abaixo).

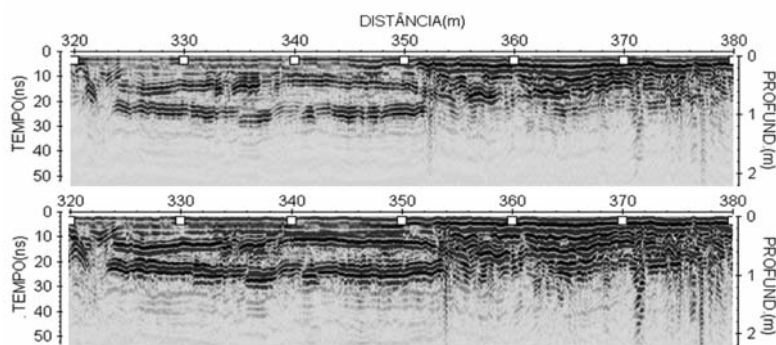


Fig. 3 – Trecho 320-380NE do perfil AB. Radargramas obtidos na maré baixa (acima) e na maré alta (abaixo).

ondas não é afetada pelo aporte de água trazido pela maré alta. Não se observa o mesmo efeito na Figura 5 entre 135 e 142NE, onde os sacos de cimento já se encontram bastante deteriorados. A destacar que o radar passou sempre não sobre a contenção, no presente caso os sacos de cimento, mas cerca de 1 m dela.

Finalmente, as Figuras 6 e 7 mostram radargramas obtidos em 210-230NE e 150-170NE, respectivamente, em zonas a 1 m de muro de contenção. A maré alta pouco afeta o trecho 210-230NE, onde a contenção está perfeita. O mesmo não ocorre com o trecho 150-170NE, onde o muro está servindo apenas para quebrar o movimento da maré, mas o movimento da água continua o seu trabalho erosivo por trás dele.

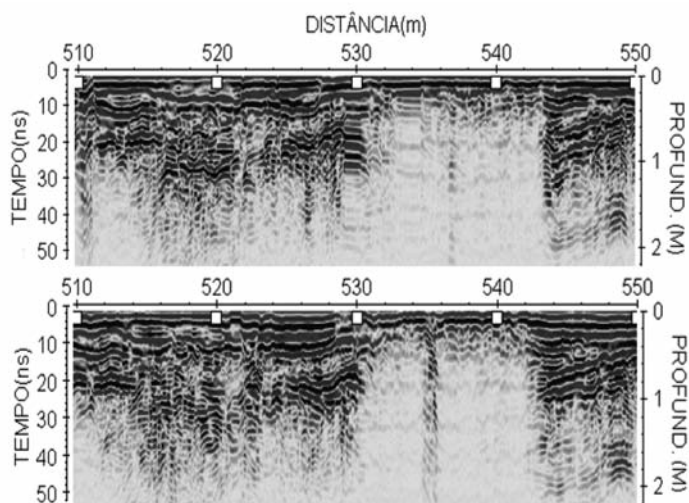


Fig. 4 – Trecho 510-550NE. Radargramas obtidos na maré baixa (acima) e na maré alta (abaixo). Sacos de cimento a cerca de 1 m de 530 e 542NE.

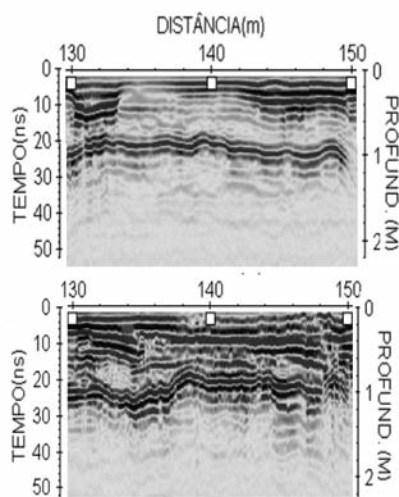


Fig. 5 – Trecho 130-150 NE. Radargramas marés baixa (acima) e alta (abaixo). Sacos de cimento antigos a cerca de 1 m de 135-142NE.

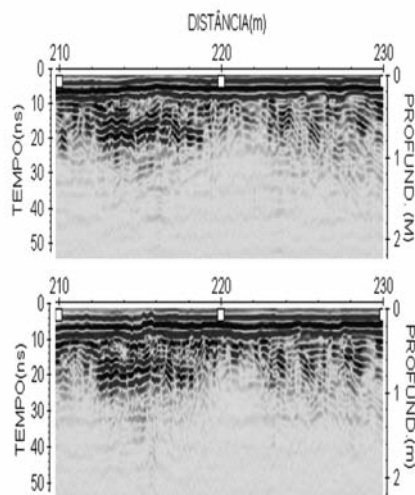


Fig. 6 – Trecho 210-230NE. Radargramas marés baixa (acima) e alta (abaixo). Muro de contenção a cerca de 1 m.

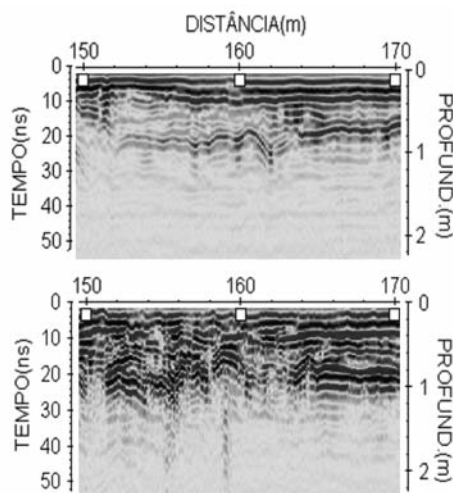


Fig. 7 – Trecho 150-170NE. Radargramas marés baixa (acima) e alta (abaixo). Muro de contenção a cerca de 1 m.

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A comparação entre resultados GPR obtidos em maré baixa e maré alta mostra explicitamente se a contenção está ou não sendo eficaz na contenção do processo erosivo. No primeiro caso, os resultados obtidos nas duas marés são praticamente os mesmos. No caso em que a contenção não é eficaz, os resultados obtidos nas duas marés diferem sobremaneira, porque a entrada de água na maré alta usa os caminhos abertos pela erosão e é percebida pelo GPR, modificando o radargrama em relação àquele obtido na maré baixa.

Os resultados mostram, portanto, que o GPR pode ser usado para inspecionar a eficácia de obras de contenção de erosão fluvial e, provavelmente, pela semelhança destas com as obras de contenção de erosão marinha, também para inspecionar estas últimas.

É recomendável o estudo desta última possibilidade bem como o aprofundamento do estudo aqui apresentado, pela aplicação rápida e econômica que o GPR pode vir a representar no controle das obras de contenção aqui consideradas.

O sucesso representado pela metodologia de comparação entre os resultados GPR obtidos nos regimes de maré baixa e maré alta desperta o interesse de se investigar se nas áreas com contenções de erosão não submetidas ao regime de marés, se a comparação de resultados obtidos antes e após chuva, ou período chuvoso, também seria útil na inspeção da eficácia das contenções nestas áreas.

7 – AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Welitom Borges, da UNB, pelo suporte no processamento com o *software REFLEX*. À prefeitura do campus da UFPA, pela colaboração com o levantamento de dados.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Augustin, C. H. R. R.; Aranha, P. R. A. (2006). *Piping em Área de Voçoramento, Noroeste de Minas Gerais*. Revista Brasileira de Geomorfologia, Porto Alegre, vol. 7, nº 1, pp. 9-18.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. (1990). *Conservação do Solo*. Ícone, São Paulo, Brasil.
- Carpenter, P. J.; Ahmed, S. (2002). *Detecting preferential infiltration pathways in soils using Geophysics*. The Leading Edge, Oklahoma, vol. 21, nº 471, pp. 471-473.
- Dias, G. N. (2012). *Estudo Geofísico sobre a Erosão Fluvial do Rio Guamá na Orla da Universidade Federal do Pará, Belém (PA)*. Dissertação (Mestrado em Geofísica), Universidade Federal do Pará/Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 108 p.
- Gregório, A. M. S.; Mendes, A. C. (2009). *Batimetria e Sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil*. Amazônia: Ciência e Desenvolvimento, vol. 5, nº 9, jul./dez., pp. 53-72.
- Matta, M. A. S. (2002). *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Pará/Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 292 p.
- Xavier Neto, P. (2006). *Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kársticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém – CE*. Tese (Doutorado em Geofísica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 176 p.
- Xavier Neto, P.; Medeiros, W. E. (2003). *Processamento e interpretação de dados 3D de GPR: aplicação na localização de estruturas de dissolução e colapso na ETO/ETE do campo de Fazenda Belém-Bacia Potiguar*. Proceedings 8th International Congress Brazilian Geophysical Society, 6 p., Rio de Janeiro.